

1. 서론 (1.2. 12)

1.1 용어

永久凍土(permafrost)란 "최소한 연속 2개의 동계와 그 중간의 하계를 포함하는 기간동안 0°C이하의 온도를 갖는 흙이나 암석이 갖는 온도조건" 으로서 "영구동결"의 의미에 가깝고 구체적으로는 다년간 얼어있는 지반(perennially frozen ground)로서 나타난다.

시베리아와 알래스카와 같이 매우 추운 곳에서는 지표부근에 겨울에는 얼었다가 여름에는 녹는 표층, 즉 활동층(active zone)이 있고 그 아래에 다년간 녹지않는 영구동토가 존재한다. 소련에서는 계절동결토(겨울에 얼었다가 여름에 녹는 지반) 및 단기동결토(겨울의 야간에 얼었다가 주간에 녹는 지반)와 함께 다년동결토를 구분하고 永久凍土는 다년동결토에 포함시키고 있다. 물론 실제로 어는 것은 간극수이다.

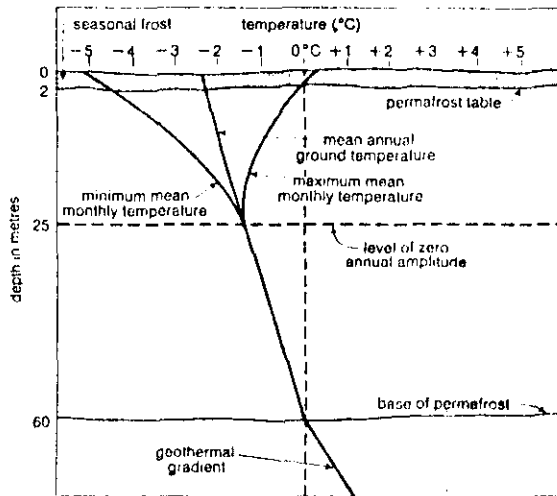


그림 1.1 지중온도변화

그림 1.1은 Alaska 중부지역의 가상 지중온도변화 상태를 보여준다. 지중온도는 지중온도구배(30.5m 내지 61m 마다 1°C씩 상승)에 따라 지표에서 지하로 점차 증가하는데 최고 월평균기온선이 0°C 선과 만나는 점이 상부에서는 영구동토면(permafrost table), 하부에서는 永久凍土기면(permafrost base)를 통과한다. 그림에서 지표하 25m 지점부터는 지온변동폭이 없는 구간이다.

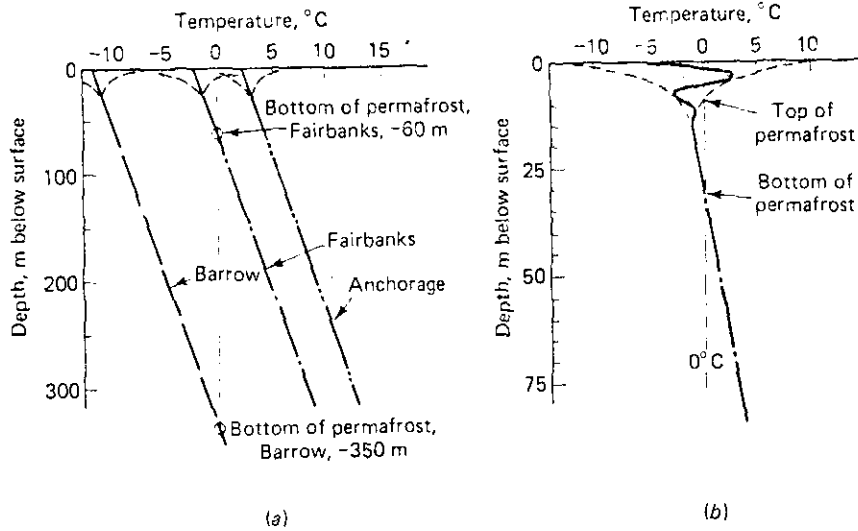


그림 1.2 (a) 심도에 따른 평균지온분포
(b) 지온의 계절적 변동

그림 1.2(a)은 Alaska의 세도시의 경우를 보여주는데 Anchorage의 경우에는 永久凍土층이 없으며 Fairbanks와 Barrow의 경우에는 永久凍土기면이 각각 -60m 및 -350m에 위치하고 있는 것을 알 수 있다. Fairbanks의 경우 永久凍土층이 얇고 온도가 -3°C 이상이므로 약간의 지표교란이 심각한 결과를 초래할 수 있음을 알 수 있다. 그림 1.2(b)는 11월 중순에 측정된 지온분포를 나타내고 지온이 기온에 따라 즉각 변동되지 않고 지연됨으로서 특이한 모양을 나타내고 있으며 이 모양때문에 채찍곡선(whiplash curve)이라고 부른다.

1.2 분포

永久凍土는 Siberia, Alaska, Canada의 북부 및 중국오지 등에 널리 분포되어 있고 그 면적은 2,100만 km^2 로서 세계 전육지의 14%에 해당된다. 이 외에 남극(1300만 km^2)과 Greenland(170만 km^2)와 같이 년중 빙하로 덮혀있는 지역이 있고 그 면적은 1600만 km^2 이나 빙하위에서는 과학적, 군사적 관측 이외의 인간활동이 없는 반면,

永久凍土위에서는 현재 인간이 거주하고 생산활동을 하고 있으며 또한 동식물이 살고 있다.

永久凍土는 그 공간적 분포형태에 따라 연속대(continuous permafrost), 불연속대(discontinuous permafrost) 및 점재대(sporadic permafrost)로 분류하는데 그림1.3은 북반구에서의 永久凍土의 분포를 보여준다.

연속대와 불연속대는 각각 소위 북극지역(Arctic region) 및 아북극지역(Subarctic region)과 대체로 일치하고 그 경계에 수목선 또는 수림한계선(tree line ; limit of tree growth)이 존재한다.

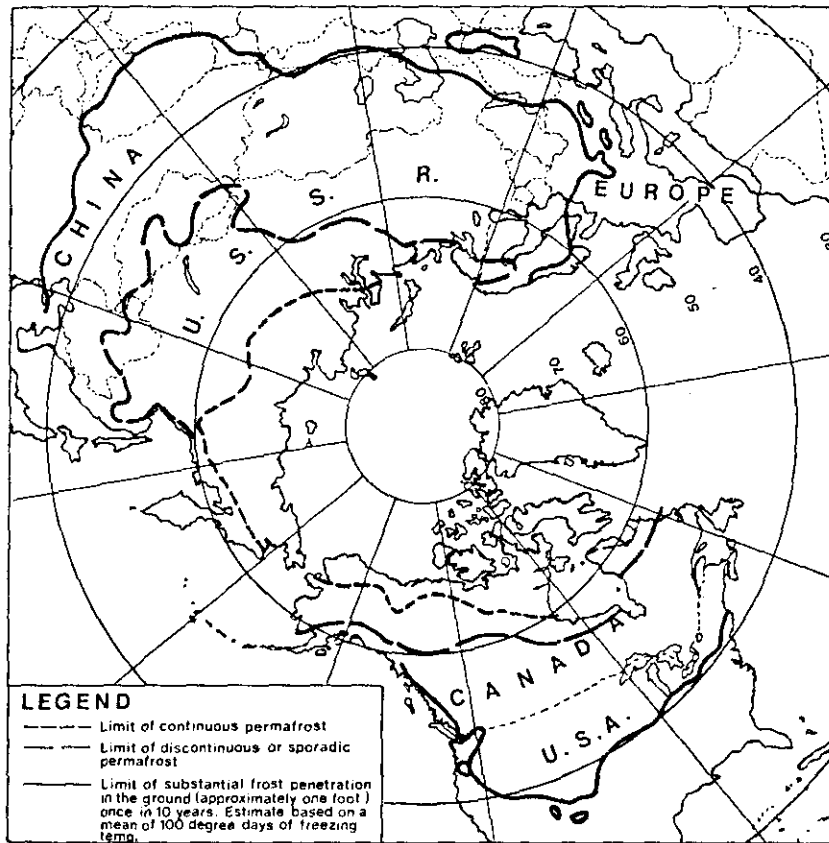


그림 1.3 북반구에서의 동토분포

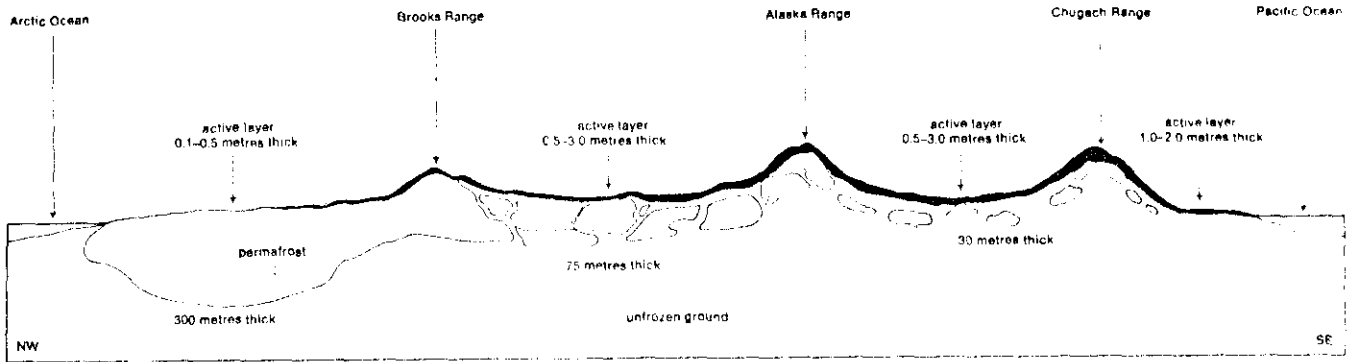


그림 1.4 알라스카의 永久凍土 단면

그림1.4는 미국의 알라스카를 북서-남동방향으로 가로지르는 단면을 보여주고 있다. 왼쪽의 북빙양에서 오른쪽으로 태평양까지 永久凍土의 두께는 300m 정도에서 점차 감소되나 활동층의 두께는 그 반대의 경향을 보여주고 있다. 永久凍土의 두께는 북 Siberia의 Yakutskaya에서 1500m 정도로 보고된바 있으나 Alaska와 Canada의 북부에서는 평균 최대두께가 300~500m 정도, 북 Siberia에서는 400~600m 정도이다. 불연속대에서의 永久凍土 두께는 Siberia의 경우 200~300m, Alaska와 Canada의 경우 50~150m이며 點在帶에서는 30m 미만이다.

1.3 연구

永久凍土의 존재는 소련의 시베리아에서 광물탐사나 수렵활동을 하면서 일찍 알려졌으나 서구인들에게는 1836년까지 대체로 알려지지 않았다. 1820년대에 시베리아의 Yakutsk에서 러시아-알라스카 무역회사 사장의 명으로 우물을 파기 시작했는데 10년간 116m를 굴진하여도 지반이 얼어 물이 나오지 않았다. 1836년 Alexander Theodor von Middendorff 라는 자가 이 Shargin 우물의 지하 107m 지점의 지온을 측정하여 이 지역의 永久凍土 두께가 약 214m라고 추정하였으며 이것이 서구에서 永久凍土에 대한 관심을 불러 일으킨 계기가 되었다. 1942년 미 육군이 알라스카에의 일본군 침공을 우려해 건설한 국도(Alaska Highway), 철도(Alaska Railroad), 1944년 부터 1953년까지 미

해군이 Beaufort Sea 연안에 시도한 석유 시추작업 등에서의 경험과 함께 제2차 세계 대전 이후 많은 나라의 연구자들이 기초연구는 물론 동상방지대책 등에 대한 광범위한 연구를 수행하고 있다. 1950년 초까지 동토의 특성에 관한 연구자료는 주로 소련에서 발간되었다. 각국의 연구현황에 대해서는 5장을 참조하기 바란다.

2. 영구동토지대의 특징^(1.2.4.13)

2.1 기후

영구동토지대의 특징중 두드러진 것이 낮은 기온이다. 표 2.1에 세계 주요도시의 위치, 동결심도, 년평균기온 및 동결지수를 나타내었다. 예를들어 Siberia의 Yakutsk의 겨울에 기온은 보통 -46°C 에 이르며 Verkhoyansk나 Oymyakon에서는 -68°C 까지 이른다. 측정된 최저기록은 북미에서는 Canada의 Yukon Territory에 있는 Snag의 -63°C 와 Siberia의 Verkhoyansk의 -71°C 이다. 사람이 느끼는 추위는 이러한 기온에 바람의 영향(wind chill)을 고려한 등가기온이며 이는 6장에서 설명하기로 한다. 이러한 추위에서는 피부가 노출되면 30초 이내에 언다고 한다. 추위외에 강수량이 적어 년간 강수량은 북빙양해안의 Tundra대에서 150mm, 내륙의 수림대(taiga)에서 300~400mm, 남쪽으로 내려가 불연속대가 되면 500~600mm에 이르러 수림도 울창해진다. Tundra 대의 지표면에는 이끼, 지의류 또는 왜소한 북극식물군이 분포하고 그 남쪽으로 수림이 산재한 수림 tundra 대가 이어진다. 전술한 수림한계선까지는 30~100 km에 이르는 이행대가 있다. 수림의 중요한 것으로는 Alaska와 Canada에서는 상록침엽수인 가문비나무, 낙엽광엽수인 칸바, 사시나무, 버드나무가 있고 Siberia에는 낙엽침엽수가 주체이다.

2.2 얼음의 형태

지반에 존재하는 얼음은 여러 형태로 존재한다.

○ 간극얼음

지반이 보유한 간극수가 유체상태에서 고체상태로 변한 것이다.

○ 빙정분리에 의한 얼음

얼음의 작은 결정이 주변과 아래로부터 흡수하여 필립이나 렌스형태의 얼음을 형성하는 것으로 그 두께는 2mm에서 13mm 정도까지이다. 이를 Taber의 얼음 이라고도 부른다.

표 2.1 동토의 두께, 년평균기온, 동결지수

나라	지명	위 치		동토의 두께 (m)	년평균기온 °C	동 토 분포상황	동결지수 (°C days)
		N	W(E)				
미 국	Barrow	71	157	300 - 400	-12.4	연속대	4800
	Prudhoe Bay	70	148	650	-12	연속대	5000
	Fairbanks	65	148	20 - 90	-3.4	불연속대	2700
	Nome	65	165	37	-3.3	불연속대	2200
카나다	Melville Island	75	110	450	-18	연속대	
	Resolute	74	95	390	-16.3	연속대	6200
	Dawson	64	139	60	-4.7	불연속대	3900
소 련	Verkhoyansk	68	134	250	-15.2	연속대	6900
	Yakutsk	62	130	200	-10.1	연속대	5600
	Moscova	56	38	1.3 (-30m 지점)	4.4	계절동토	1000
일 본	사뵈토	43	(142)	0.6	7.6	계절동토	350
	쿠시토	43	(145)	0.7	5.3	계절동토	600
한 국	서울	37.5	(127)	0.79	11.1	계절동토	409
	대전	36.5	(127.5)	0.62	11.5	계절동토	346
	광주	35.2	(127)	0.28	13.1	계절동토	168
	대구	35	(128.5)	0.25	14.0	계절동토	190
	부산	36	(129)	0.42	13.0	계절동토	64

○ 얼음썰기(ice wedge)

활동층과 영구동토와의 경계면 즉 영구동토면에서부터 아래쪽에 꼭지점을 둔 역삼각형 형태로서 지중에 썰기를 박은 모양이다. 이는 온도수축에 의해 발생한 크랙속에

얼음이 성장하여 형성된 것으로 그 형성과정은 그림 2.1과 같다.

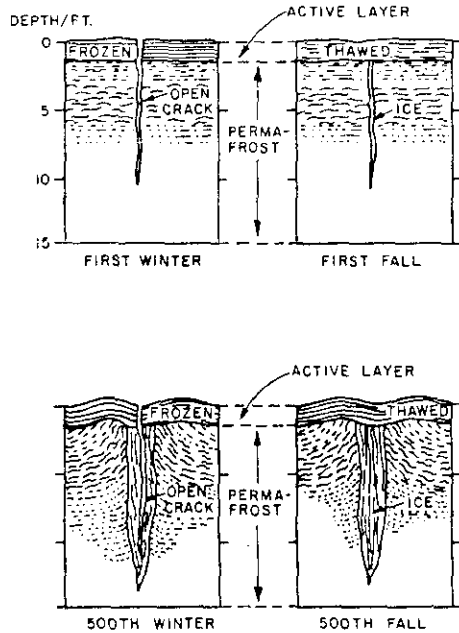


그림 2.1 얼음썰기의 형성과정

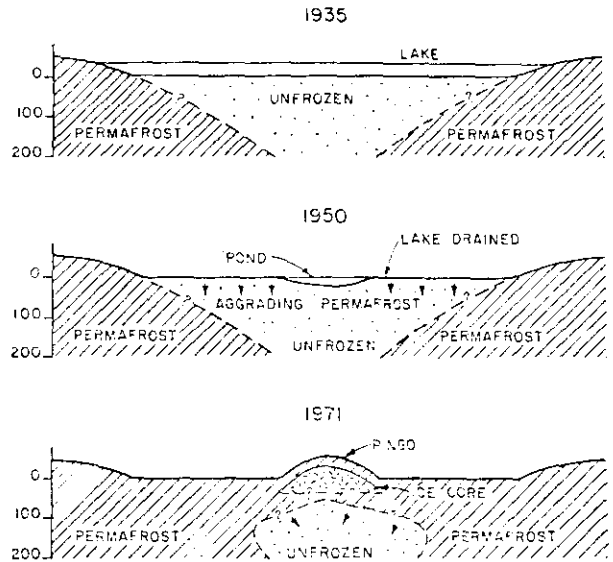


그림 2.2 핑고의 형성과정

○ 핑고(pingos) 얼음

압력상태의 지하수가 위로 분출하여 수평방향으로 긴 텐스형태의 얼음을 형성한 것이다. 평활한 습지대의 중앙에 볼록 솟아나 작은 언덕을 형성한 것을 "핑고"라 하며 그 안에 얼음이 차 있다. 핑고의 높이는 수m에서 60m 정도까지 있다. 그림 2.2는 핑고의 형성과정을 보여준다. 이것은 배수가 된 호수의 물이 얼면서 용기하여 형성된 것으로 폐쇄형 핑고 또는 Alaska의 Mackenzie Delta에서 많이 발견된다 하여 Mackenzie형 핑고라 부르며 이에 반해 전술한 지하수에 의해 형성된 핑고를 개방형 핑고라 부른다.



○ 集塊氷(buried ice)

호수, 강, 재결정된 눈, 과거 빙하의 조각 등이 언채로 지반에 매몰된 것으로 보통 지면하 2~5m에서 부터 아래로 연장된 거대한 얼음덩이로 깊이는 최대 30m 까지, 폭은 수 10m에서 1km 정도까지 된다고 한다.

2.3 지형

영구동토의 표층부는 여름에 녹고 겨울에 어는 활동층이 원인이 되어 여러가지 특징적 지형이 나타난다.

○ 구조토(patterned ground)

지표면에서 발견되는 규칙적인   모양이 반복되는 형태로서 그 모양에 따라 원형토, 線狀土, 다각형토(polygons), 계단토 등으로 불리운다. 이러한 형태의 경계에는 자갈이 규칙적인 모양을 형성하는 경우도 있는데 자갈이 지표로 용기하는 과정이 그림 2.3에 나타나 있다. 이러한 지표구조는 지표의 경사에 따라 계단형 또는 선상을 나타낼 수 있다(그림 2.4).

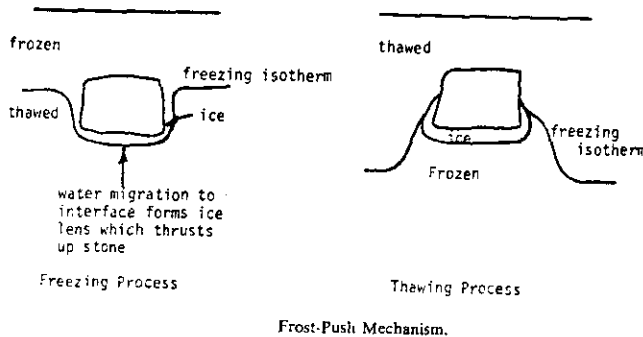
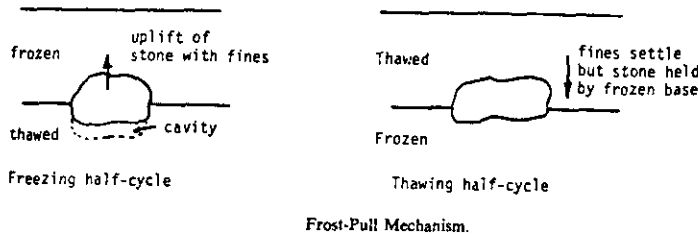


그림 2.3 자갈의 용기

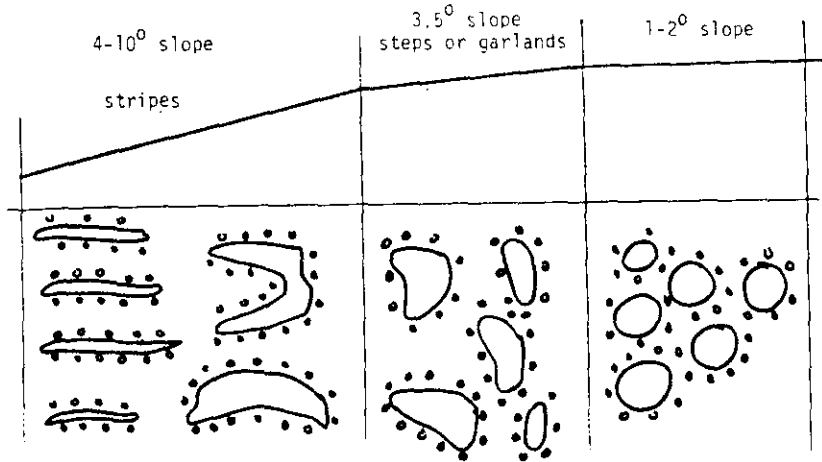


그림 2.4 분리된 자갈의 사면경사에 따른 형태 변화

○ 필사(palsa)

높이가 최고 10m 정도인 둥근 언덕으로 그 안에 7m정도의 이탄(peat) 이 들어있다. 주로 영구동토의 불연속대에서 발견된다. 이탄의 축적과 얼음의 분리로 형성된다.

○ 아이싱(icing, aufeis)

지하수의 흐름의 동결로 중단되어 지표로 나와 판상으로 겹겹이 쌓여 형성된 얼음으로 도로의 절토부 등에서 배수상태가 좋지 않으면 형성될수 있다.

○ 써모카스트(thermokarst)

영구동토가 열적으로 교란되면 융해하고 융해 압밀이 일어나 불규칙한 지표틀 형성하고 그 지표형태가 석회암 지반에서와 비슷하게 된다. 도로건설과 같이 지표의 보온상태를 교란시키면 써모카스트현상이 발생하기 쉽다.

○ 아라스(Alas)

Siberia의 Yakutsk 주변에서 많이 발견되는 지형으로 樹林帶 가운데 접시 모양의 분지가 형성된 것이다. 분지의 깊이는 1m 부터 10m 정도, 폭은 수십 m에서 수 km 까지 이르고 가운데 호수로 성장하는 수도 있다.

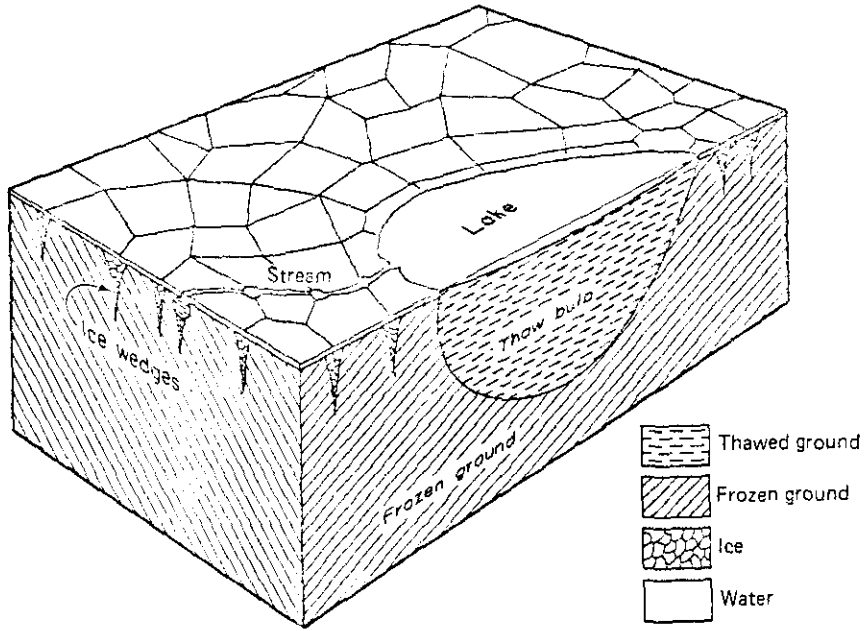


그림 2.5 구조토

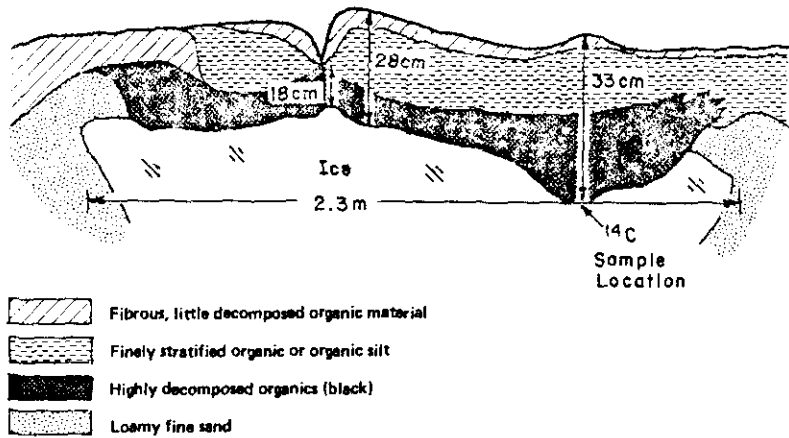


그림 2.6 얼음썰기의 상부단면

그림 2.5는 지표의 구조토형태, 얼음썰기 및 표면이 얼어붙은 호수의 용해벌브 (thaw bulb)를 보여준다. 또한 하천의 모양이 구조토의 접촉부에서 구슬이 꿰인 모양으로 된 것(beaded stream)도 볼 수 있다. 그림 2.6은 Alaska에 발견한 얼음 썰기의 상부단면을 보여준다.

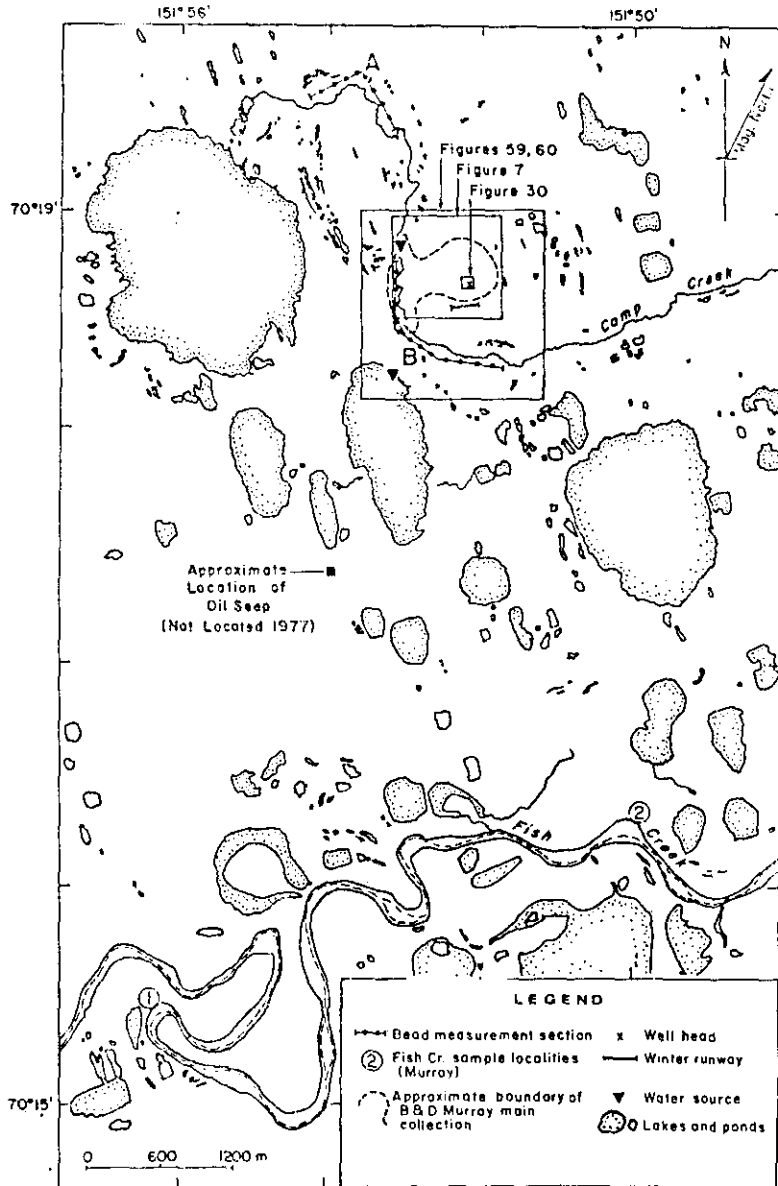


그림 2.7 Fish Creek, Alaska 주변의 지형

그림 2.7은 Alaska의 Beaufort 해안, Prudhoe Bay 동쪽의 Fish Creek 주변의 지형을 보여준다. 얇은 구릉지대의 지형으로 많은 호수와 연못들이 북서-동남향으로 배열되어 있는 것을 볼 수 있다.

2.4 환경

극지의 환경은 광막한 평원, 바다와 산 등 규모가 크나 색채와 형태가 단조롭다. 여름에는 태양이 지평선 위에 낮게 떠서 계속 회전하는白夜와 긴 겨울의 어둠사이에서 생태와 자연이 미묘하고 섬세한 평형을 유지하고 있다. 여름에도 태양광선이 지표에 경사지게 투사되는 것과 지표의 반사율(albedo)이 커서 (물:10%, 흙:20%, 눈:50% 이상) 지온이 크게 상승하지는 않는다.

視界에 영향을 주는 요소

○ 氷映(ice blink)

구름이 많을 때 멀리 보이지 않는 氷原이 반사되어 지평선 아래에 나타나는 신기루와 비슷한 현상.

○ 氣溫倒錯(temperature inversion)

찬 대기의 유입 또는 지표의 급격한 냉각으로 지표부근의 기온이 상부의 기온보다 낮아지는 현상이다.

○ 얼음안개(ice fog)

기온도착이 일어나면 지표부근의 수분, 얼음입자 등으로부터 안개층이 형성된다. 이때 대기의 이슬점 온도가 0°C 보다 높으면 보통의 안개가 형성되나 이것이 0°C 보다 낮으면 얼음안개가 된다.

○ 대기비등(atmospheric boil)

온도차에 의하여 형성된 지표에 가까운 공기층이 불완전하게 혼합되어 있을 때, 즉 시계를 따라 공기의 밀도가 다를 때 빛의 굴절로 영상이 왜곡되는 현상이다.

○ 바람에 날리는 눈

바람의 속도가 약 13 kph 정도면 눈이 날리기 시작하고 대체로 대부분의 눈이 지표에서 30cm 이내에서 이동하므로 지표를 볼 수 없게 된다.

○ 極地白明(Arctic Whiteout)

기온도착으로 안개층이 형성되었을 때 태양의 복사광이 다소 증가하면 안개층은

지표에서 상부로 약간 이동하고 이때 복사광이 안개층과 눈덮힌 지표사이에서 반사, 산란, 재반사 할 때 일어나는 현상이다. 그림자와 지평선을 볼 수 없게 되고 거리, 물체의 크기 및 방향에 대한 감각을 잃기 쉽다.

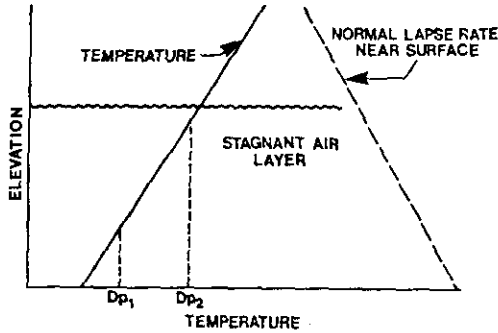


그림 2.8 기온 도착과 얼음안개

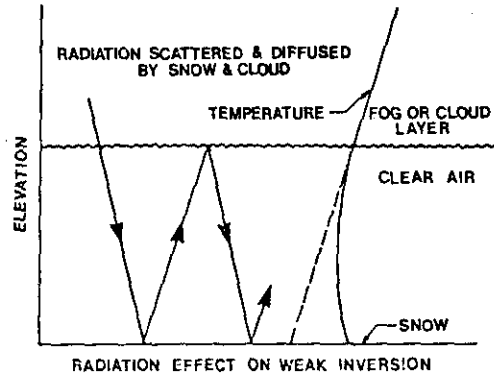


그림 2.9 극지 백명

○ 설맹(snow blindness)

태양빛이 눈과 얼음에 반사될 때 눈이 부시어 보이지 않는 현상으로 눈에 손상을 줄 수도 있으므로 보안경이 필요하다.

○ 밤과 낮

북극권 (북위 $66^{\circ}33'$)과 남극권 (남위 $66^{\circ}33'$)에서는 하지와 동지에 각각 24시간의 낮과 밤을 갖게 된다. 여기서 더 북쪽 또는 남쪽으로 갈수록 낮과 밤의 길이가 점차로 길어져서 극점에서는 6개월의 낮과 밤이 있게 된다.

극지에서는 봄과 가을이 짧고 봄이 지연되어 6월이나 7월초가 봄이된다. 눈이 녹으면 꽃이 필때까지 3주정도 걸리며 꽃이 피고, 지고 씨를 맺는 기간이 매우 짧으나 동식물의 성장속도는 늦고 사람은 쉬 늙는다 한다. tundra 지대에서는 모기가 많아 Canada의 극지에서 한 연구자가 측정한 바에 의하면 1분간에 9000번 물렸다 하며 이로 인해 입원하는 경우도 드물지 않다 한다. 여름동안에도 지표의 1m 정도가 녹으나 녹은 물이 배수가 되지 않아 지반이 질다. 영구동토지대의 tundra는 너무나 섬세하여 사람이 지나간 발자국이 수십년간 영향을 미친다고 한다.

3. 흙의 저온특성 (1.4.7.14)

3.1 동토의 구성성분

동토의 구성성분은 아래와 같이 4종으로 고려할 수 있다.

- 고형성분 : 흙 입자의 무기질과 유기질이 이에 포함된다.
- 기체성분 : 기체 또는 수증기가 이에 포함된다.
- 액체 또는 부동수 : 흙입자-물 시스템을 생각할 때 흡착수(adsorbed water, bound water), 이중층수(double layer water) 및 자유수(free water)를 구분할 수 있고 (그림 3.1 참조), 이들 간극수는 0 °C 이하의 온도에서 동결하는 것으로 알려져 있다(그림 3.2 참조).

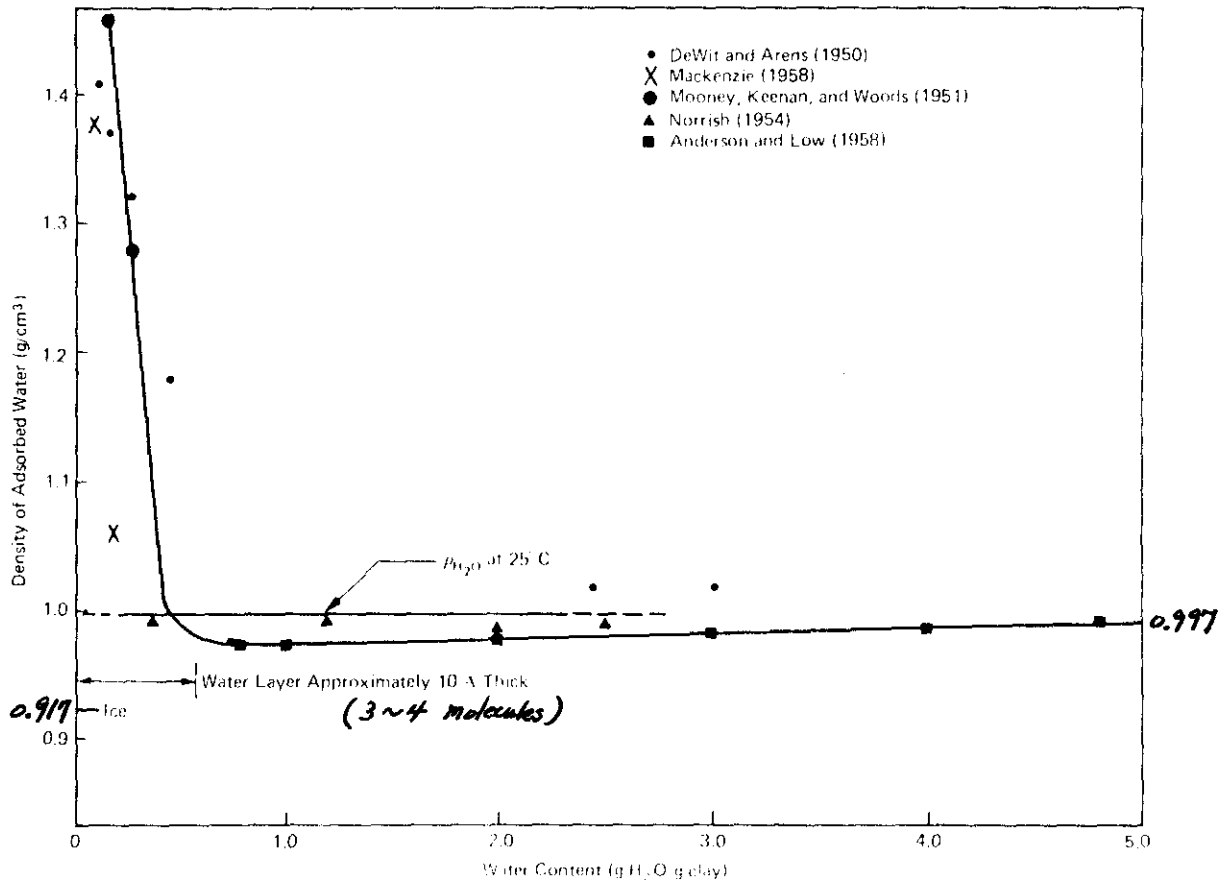


그림 3.1 흡입자-물 시스템에서 물의 밀도

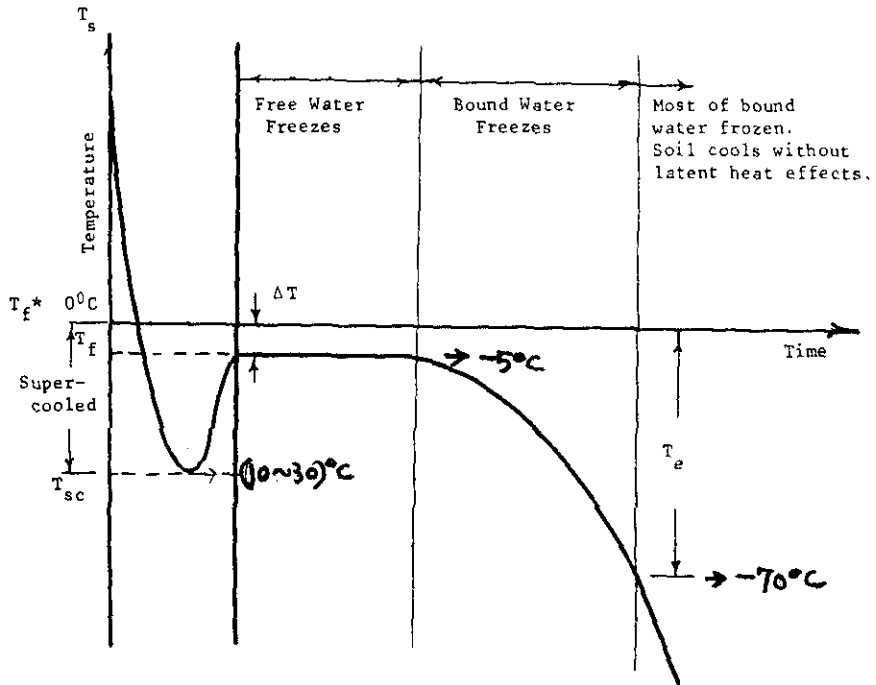


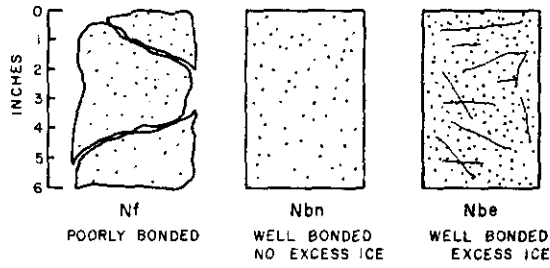
그림 3.2 간극수의 동결

- 얼음 : 얼음은 점소성이 강한 물질로서 육각형의 결정구조를 갖고 있으며 물이 동결하여 형성된 보통의 얼음을 "얼음 I" 이라 부르나 고압 하에서 존재하는 다른 형태의 얼음들이 "얼음 II"부터 "얼음 VIII" 까지 있는 것으로 알려져 있다.

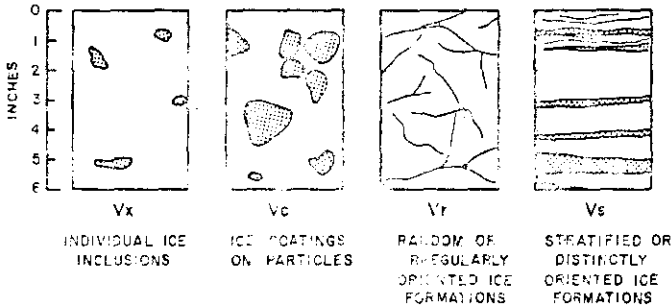
3.2 동토의 분류

보통 통일분류법(USCS)으로 흙을 분류하고 이에 흙속의 얼음상태를 묘사하는 기호를 추가한다(그림 3.3, 표 3.1 참조).

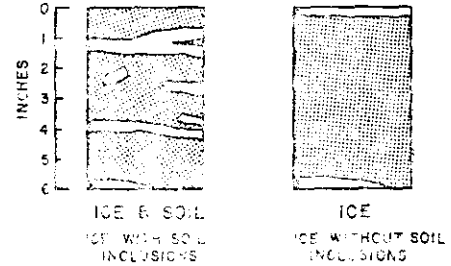
a. NON-VISIBLE ICE



b. VISIBLE ICE



c. VISIBLE ICE - GREATER THAN 1 INCH THICK



LEGEND: SOIL - [stippled box] ICE - [cross-hatched box] OR [dotted box]

그림 3.3 흙속의 얼음표사

표 3.1 흙속의 얼음 분류

Major Group		Subgroup	
Description	Designation	Description	Designation
Segregated ice not visible by eye	N	Poorly bonded or friable	Nf
		No excess ice	n
		Well bonded Excess ice	Nb e
Segregated ice visible by eye (ice 25 mm or less thick)	V	Individual ice crystals of inclusions	Vx
		Ice coatings on particles	Vc
		Random or irregularly oriented ice formations	Vr
		Stratified or distinctly oriented ice formations	Vs
Ice greater than 25 mm thick	Ice	Ice with soil inclusions	Ice + soil type
		Ice without soil inclusions	Ice

3.3 동토의 열적성질

열전도의 문제는 유체의 흐름, 전기의 전도 및 화학물질 농도의 확산문제와 유사하다(표 3.2).

표 3.2 1차원 전도

	Heat	Fluid	Electrical	Chemical
Governing law	Fourier's law	Darcy's law	Ohm's law	Fick's law
Basic equation	$\phi = -K \frac{\partial T}{\partial Z}$	$\phi h = -K \frac{\partial h}{\partial Z}$	$I = -\sigma \frac{\partial V}{\partial Z}$	$J = -D \frac{dC}{dZ}$
Terms	ϕ : flow T : temperature K : thermal conductivity	ϕ : flow K : permeability (hydro conductivity) h : total head	I : current σ : electrical conductivity V : voltage	J : flow D : diffusion coefficient C : concentration

따라서 열전도의 문제는 1차압밀과 유사하게 처리할 수 있으나 아래와 같은 원인으로 어려움이 있다.

- 1) 초기 및 경계조건의 정의가 어려움.
- 2) 열적하중의 정량화와 그의 시간적 공간적 변화에 따른 어려움.
- 3) 흙의 열적성질과 그 변화에 대한 불확실성.
- 4) 열적성질의 불균질성과 이방성에 따른 어려움.
- 5) 지하수의 흐름과 열적흐름이 관련되었을 때의 어려움.

○ 열전도율(Thermal Conductivity)

이는 단위 열구배하에서 열흐름의 속도이다. 주요 재료의 열전도율은 표 3.3과 같다.

표 3.3 주요 재료의 열전도율

재 료	열전도율, Kt (W/m.K)
콘크리트	1.3 - 1.7
아스팔트 콘크리트	1.05 - 1.52
구 리	386
얼음(0 °C)	2.23
눈	0.086 - 0.340
석 회 암	1.3 - 5.0
사 암	1.8 - 4.2
혈 암	1.5
화 강 암	1.7 - 4.0

열전도율은 Btu/h.ft °F, cal/s.cm °C 또는 W/mK의 단위로 쓰인다.

○ 열용량(Heat Capacity)

단위중량 또는 단위체적당의 물질이 보유하고 있는 열량으로서 단위중량일 경우 비열(specific heat), 단위체적일 경우 체적열용량(volumetric heat capacity)라 부른다. J/kg °K, Btu/ft³ °F, cal/cm³ °C 또는 kJ/m³K의 단위가 쓰인다.

표 3.4 비 열

물 질	열 용량, (J/kg °K)
물	4186
얼 음	2093
흙, 암석의 입자	710

부동결토와 동결토에 대한 열용량은 각각 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$C_u = \gamma_d \left(C_m + \frac{C_w \cdot W}{100} \right) \dots \dots \text{부동결토}$$

$$C_f = \gamma_d \left(C_m + \frac{C_i \cdot W}{100} \right) \dots\dots \text{동 결 토}$$

여기서 γ_d : 건조밀도, W : 함수비(%), C_m, C_w, C_i : 각각 흡입자, 물 및 얼음의 열용량이다.

○ 잠열(Latent heat)

물질이 동결 또는 용해할 때 방출하거나 흡수하는 열량으로서 물의 잠열이 0 °C에서 79.7 cal/g 이므로 흡속의 물이 0 °C에서 동결한다고 가정하면 흡의 잠열은,

$$L = 79.7 W \cdot \gamma_d \quad \text{로 된다.}$$

여기서 γ_d : 건조밀도, W : 함수비이다.

잠열은 cal/g 또는 Btu/lb 의 단위로 쓰인다.

4. 토질 공학적 문제점 ^(2.4.7)

4.1 동상(Frost heave)

동결한 흙이 지반을 융기 시키는 현상으로 물이 동결하면 그 체적은 9% 정도 팽창하게 된다. 따라서 간극수가 얼면 지반의 팽창은 이보다 훨씬 작게 된다. 그러나 전술한 빙정 분리현상에 의해 얼음결정이 주변과 하부의 부동결수를 흡수하여 얼음렌스를 형성하게 되면 9% 보다 몇배나 큰 지반융기가 가능하다.

그림 4.1에서와 같이 지표에서부터 깊이가 깊어질수록 얼음렌스의 두께는 두꺼워지고 얼음렌스 사이의 간격은 커진다.

동상을 지배하는 요소는

- 1) 흙의 종류와 상태
- 2) 열 제거율 (e.g. 기온의 저하속도)
- 3) 간극수의 상향이동 (모세관 현상)
- 4) 구속응력 이다.

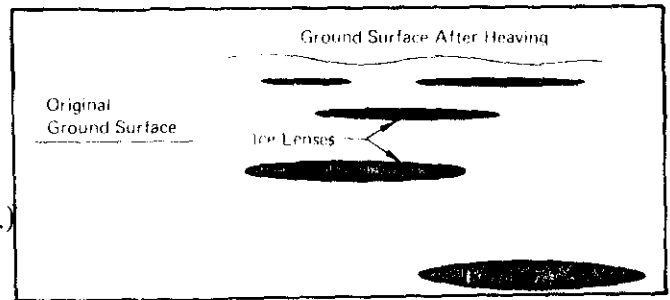


그림 4.1 얼음렌스와 동상

동결심도를 계산하는 데에는 Stefan식, Aldrich식, 수정 Berggren 식 등이 제안되어 있으며 실무에 많이 사용되는 미 육군 공병단의 방식은 국내에 잘 알려져 있다.

4.2 강도

○ 압축강도

흙이 동결하면 압축강도가 증가하며 동결온도가 낮을수록 강도가 증가한다.

Phukan에 의하면 5%/min 의 변형도로 실험한 1축압축강도는

$$\sigma_c = 0.7 - 0.45T \quad : T < -3.9^\circ\text{C}$$

$$\sigma_c = 0.55 - 0.4T + 0.1T^2 \quad : T > -3.9^\circ\text{C}$$

의 관계가 있다. 여기서 σ_c 는 MN/m^2 의 단위, T 는 $^\circ\text{C}$ 의 단위이다.

○ 전단강도

동결토에도 Mohr-Coulomb 파괴이론을 적용할 수 있다. 동결토의 경우 부동결토에 비하여 ϕ -값은 감소하고 C -값이 증가하는 경향을 볼수 있다.

○ 장기강도

Vyalov에 의하면 동결토의 장기강도는

$$\sigma_u = \frac{b}{\log_e (t/B)}$$

여기서 b, B는 흙의 종류, 특성 및 온도에 따른 정수이고 σ_u 는 파괴시의 강도, t는 파괴까지의 시간으로서 시간이 갈수록 강도가 감소됨을 알 수 있다.

○ 크립(Creep)

얼음이 점소성 물질이므로 변형의 계산에 Creep을 고려하여야 한다.

4.3 용해침하와 압밀(Thaw Settlement and Consolidation)

○ 용해침하

그림 4.2와 같이 동결토가 용해하면 용해침하가 발생한다.

이 용해침하의 변형도(thaw strain)는 동결토의 밀도의 함수로서

$A = 0.76 - 1.018 \ln \rho_f \pm 0.07$ 로서 Nixon과 Ladanyi가 제안한바 있고 Crory는

동결토의 초기 간극비 e_f 와 용해토의 종말간극비 e_t 의 함수로서

$$A = \frac{e_f - e_t}{1 + e_f} \text{로 제안한바 있다.}$$

그림 4.3은 점토질 이토와 점토에서 밀도와 용해침하의 관계를 보여준다.

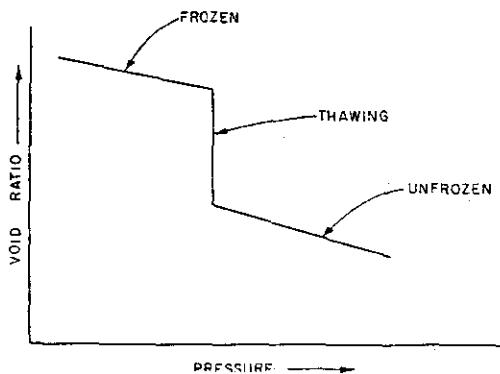


그림 4.2 용해침하

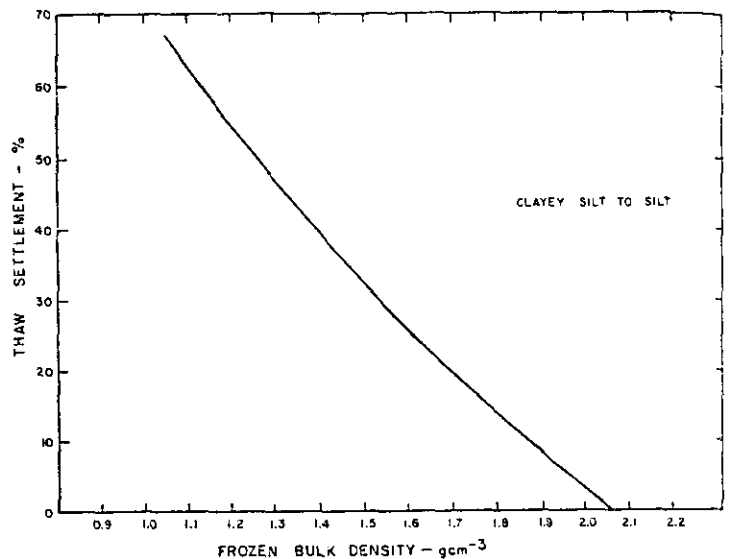


그림 4.3 용해침하와 밀도와의 관계

○ 용해압밀(Thaw consolidation)

동결된 지반이 용해할 때 그 용해속도가 간극수압의 소산속도보다 빠르면 과응간극수압이 발생하고 이에 의해 압밀이 일어난다(그림 4.4). 간극수의 이동은 상향으로 일어나며 Terzaghi의 1차 압밀 이론을 그대로 사용할 수 있다. 그림 4.5는 용해 압밀 시험장치를 보여준다.

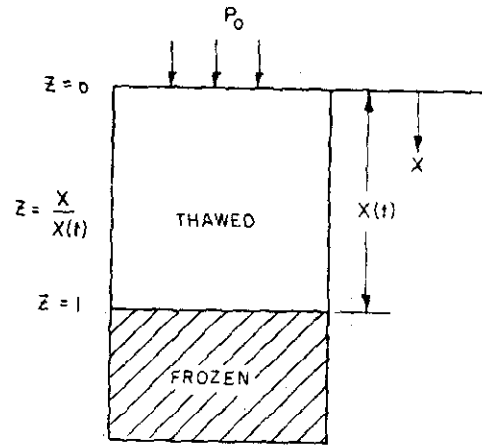


그림 4.4 일차원 용해압밀

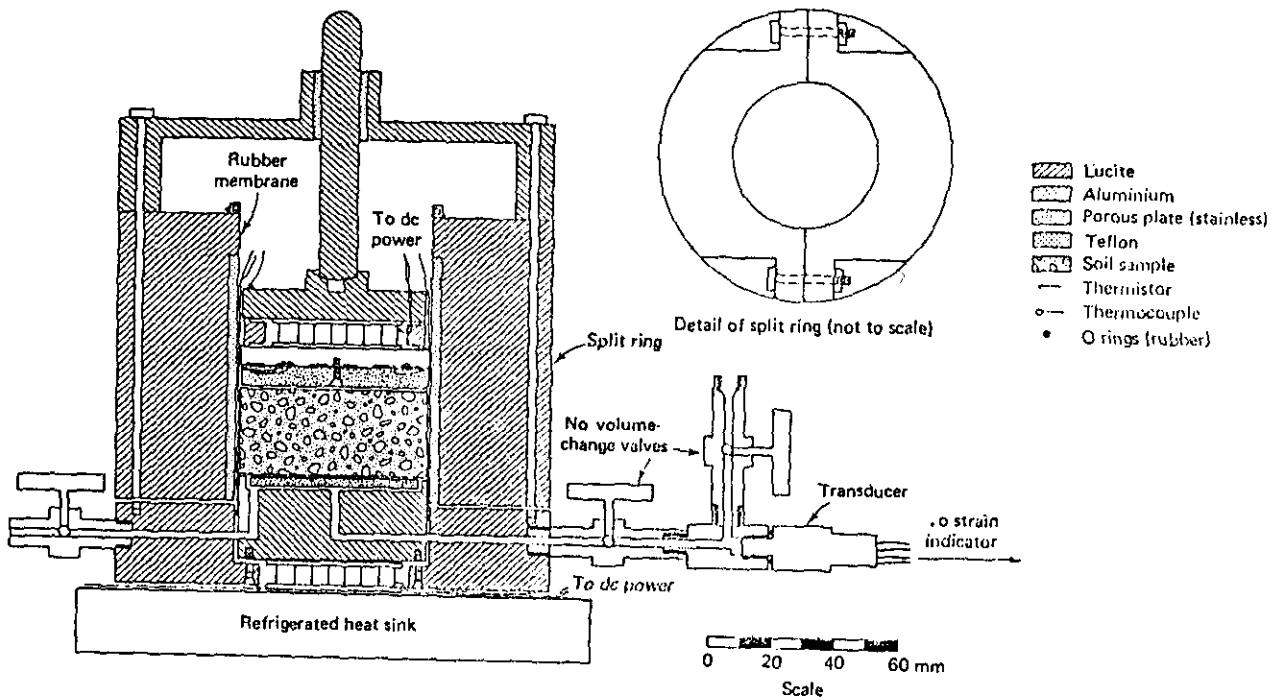


그림 4.5 용해 압밀 시험장치 예

4.4 기초설계에 대한 접근방법

영구동토지역에서의 기초설계에는 다음과 같은 접근방법이 있을 수 있다.

- 1) 영구동토로 동결된 상태로 유지
- 2) 시공후 영구동토의 용해를 감소
- 3) 지반 개량
- 4) 영구동토를 무시

이러한 접근방법에 대한 선정기준과 기초의 종류를 표 4.1에 보였다.

표 4.1 동토지역에서의 기초설계 접근방법

Foundation design approach for the arctic and subarctic

-
- I. Unfavorable foundation materials when permafrost has thawed (fine-grained soils or rock containing ground ice)
 - A. Maintain existing thermal regime (applies to continuous and discontinuous permafrost zones)
 - 1. Permanent construction
 - a. Piling
 - b. Spread footings
 - c. Posts and pads
 - d. Ducted foundation
 - e. Artificial refrigeration
 - f. Rigid structural base
 - 2. Temporary construction
 - a. Posts and pads
 - b. Sills
 - c. Slabs or rafts
 - B. Accept thermal-regime changes caused by construction (applies to continuous and discontinuous permafrost zones)
 - 1. Permanent construction
 - a. End-bearing piles, caissons, or footings to stable stratum
 - b. Rigid structural base (for small structures only)
 - 2. Temporary construction
 - a. Piling
 - b. Perimeter sills
 - C. Modify foundation conditions before construction (applies primarily to discontinuous permafrost zone)
 - 1. Permanent and temporary construction: use designs applicable for conditions resulting after:
 - a. Prethaw and preconsolidation of unfavorable materials
 - b. Replacement of unfavorable materials
 - II. Favorable foundation materials when permafrost has thawed (clean, granular soils or rock without ground ice): use designs applicable to temperate zone
-

○ 얇은 기초

상기한 네가지 접근방법중 1)의 방법이 가장 많이 사용되며 가장 간단한 대책은
 지반과 기초사이의 공간을 두는 방법이고 또한 기초에 자갈층을 두껍게 포설하거
 나 (그림 4.6), 열교환장치를 기초에 매설하여(그림 4.7) 지상의 찬공기와 열교
 환을 시키거나 기계적인 냉동장치에 연결된 냉각 파이프를 기초에 매설하기도
 한다(그림 4.8).

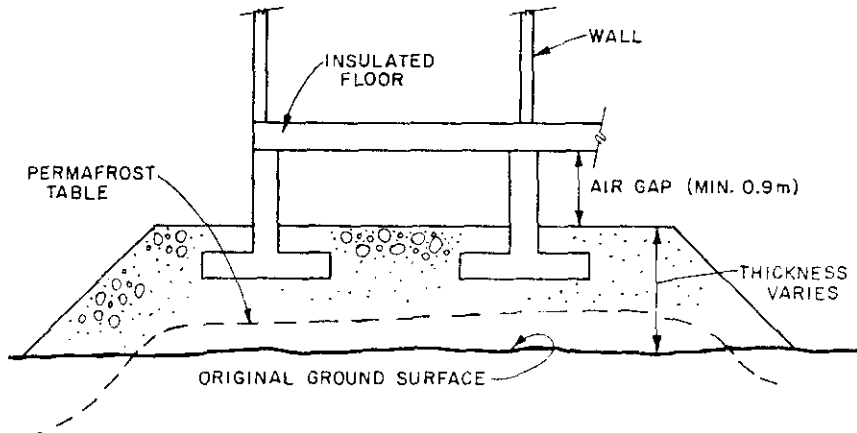


그림 4.6 자갈층 포설 기초

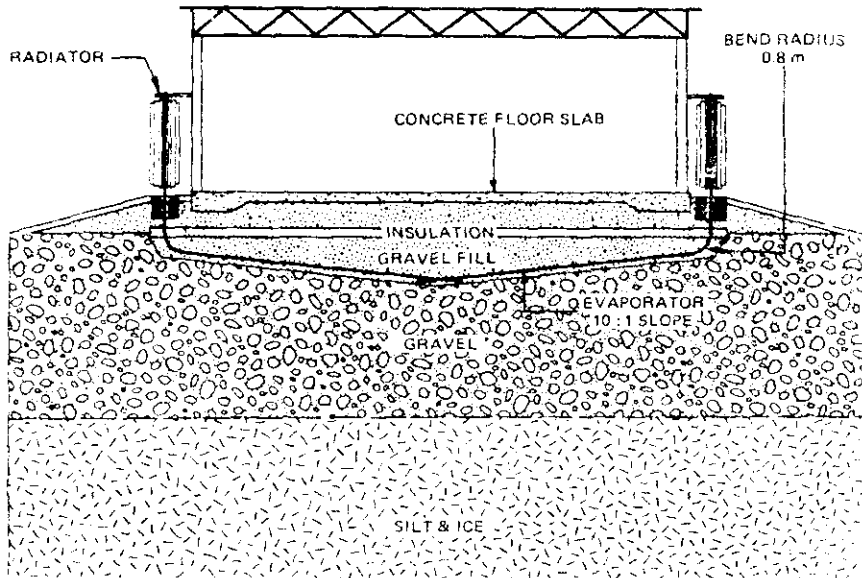


그림 4.7 캐나다의 Ross River 학교

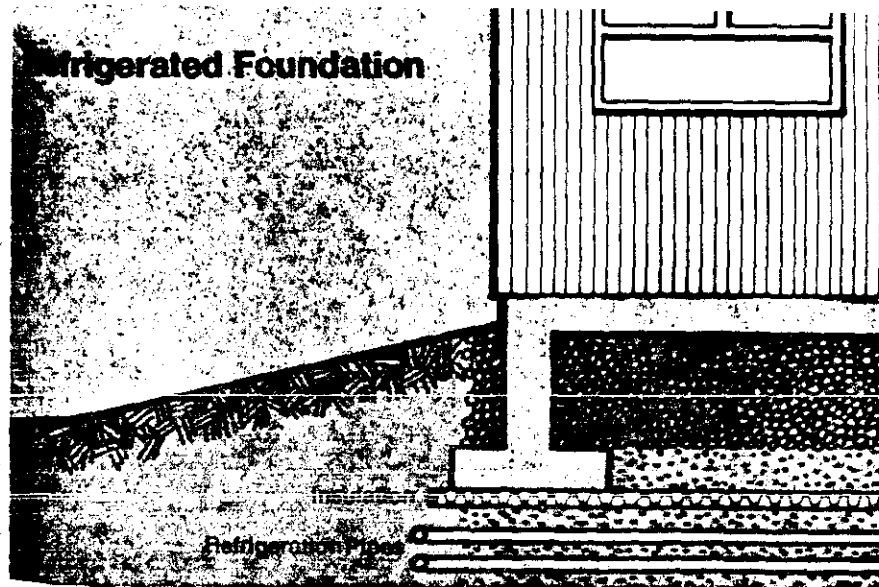


그림 4.8 기계적 냉동 기초

○ 깊은 기초

말뚝기초에서 고려할 사항중의 하나는 凍着(Adfreezing) 이다. 이는 지반이 동결할때 주변의 구조물 표면에 부착하여 상당히 큰 부착력을 나타내는 현상으로 주변지반이 동상을 일으킨다면 말뚝을 용기시키게 된다. 현장실험 결과에 의하면 동착력의 크기는 강철표면의 경우 100 kPa, 목재나 콘크리트의 경우 65 kPa 정도라 한다. 최대 동착력이 130 내지 230 kPa 정도인 경우도 보고가 되어 있다. 이에 대한 대책도 역시 열교환 장치를 사용할 수 있고 그림 4.9는 Alaska pipe line에서의 강관 말뚝 기초형태를 보여준다.

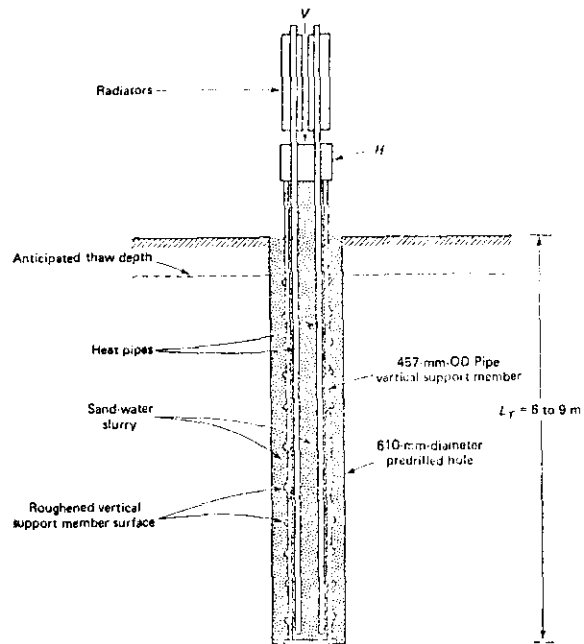


그림 4.9 Alaska pipeline 지지장치

○ 배 관

동토지역에서의 상하수도는 보통 지하공동구(utilidor)에 설치하고 내부에는 적절한 보온과 경계에는 단열재를 사용해야 한다. 그림 4.10은 Alaska와 Canada의 한지에서 사용되는 공동구의 예를 보여준다.

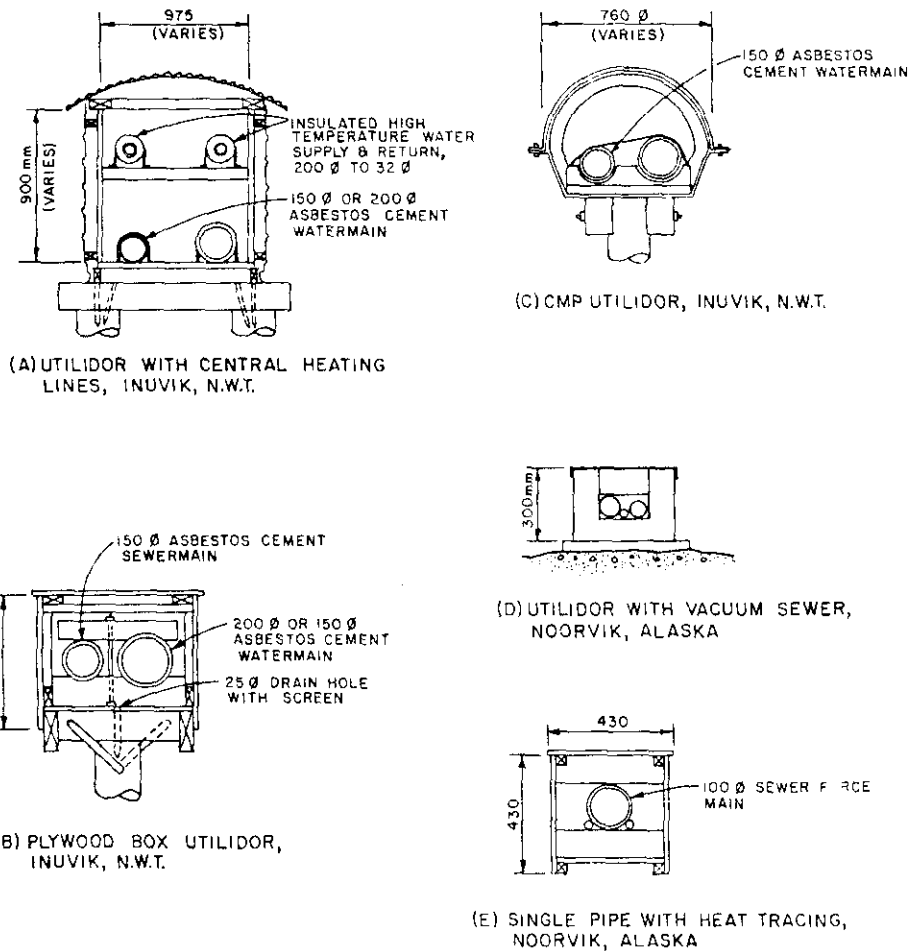


그림 4.10 한지에서의 공동구

4.5 사면안정

영구동토지역에서의 절취사면은 가능한한 피하는 것이 좋다. 절취사면이 심각한 안정문제를 일으킨 사례가 많기 때문이다. 그림 4.11은 절취사면의 변형과정을 보여주며 그림 4.12는 보호공법의 예를 보여준다.

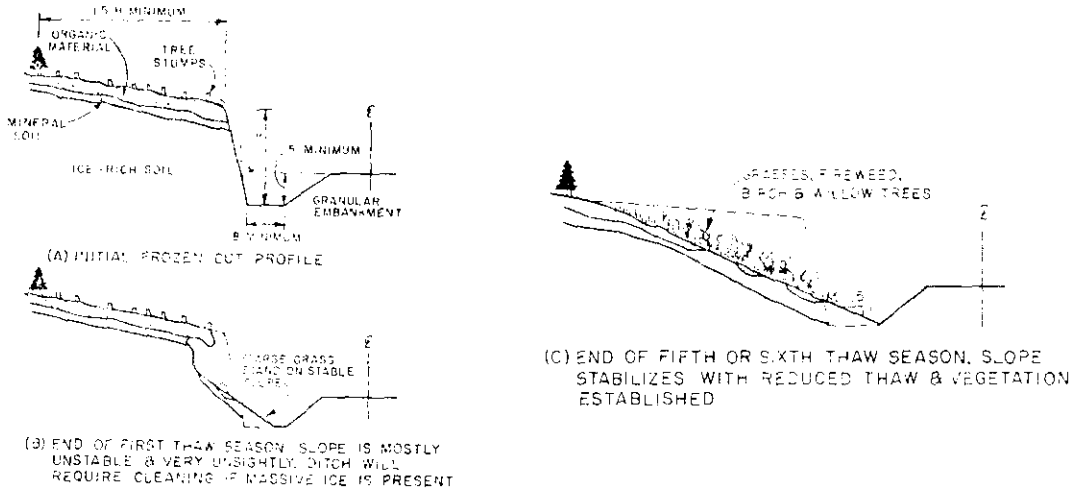


그림 4.11 절취사면의 변형과정

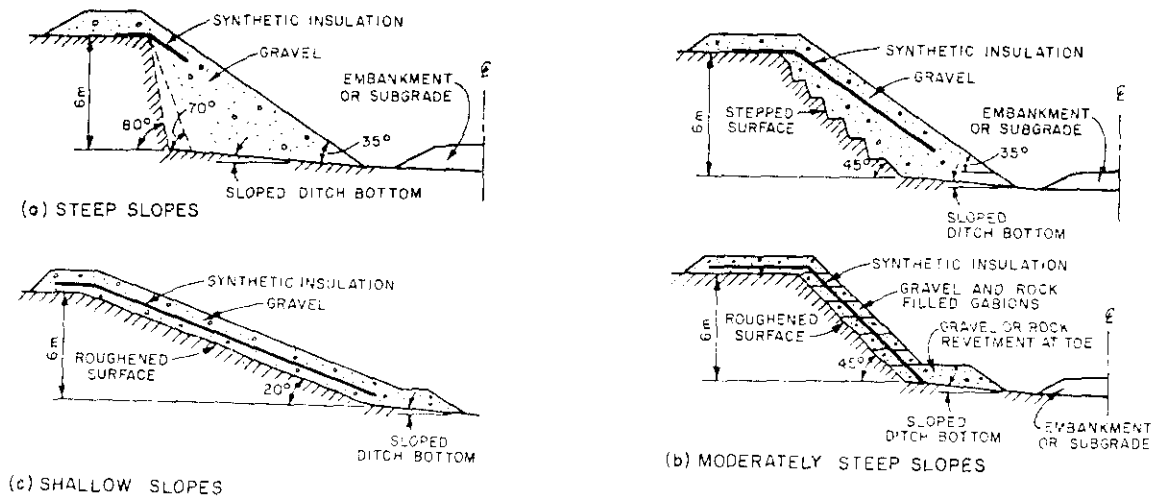


그림 4.12 절취사면 보호공법 예

4.6 지반조사

영구동토 지대에서의 지반조사는 보통의 지반조사보다 몇가지 조사사항이 더 필요하다. 즉 얼음함량, 지반의 동결 가능성(frost-susceptibility), 동결 및 융해도의 특성, 동결심도 등과 관련하여 지온의 측정도 중요하다. 불교란 시료는 test pit 이나 trench를 기계로 굴착한 후 채취하거나 boring 하여 core를 채취하기도 한다. boring 시 순환 유체로는 다-젤유, 염수, 알콜 등이 사용되기도 한다.

시료는 강도, creep 및 용해압밀시험을 위한 것이면 녹지 않도록 ice box에 눈, 얼음과 함께 넣어 운반하거나 현장에 냉동차를 가져가기도 한다.

시료의 특성과 또한 동토지역의 불균질성 때문에 가급적 많은 시험이 바람직하므로 실내 실험보다는 현장실험을 수행하는 경우가 많으며 pressuremeter 시험이나 Dutch cone 시험이 주로 사용되고 평판재하시험도 사용된다.

온도를 측정하는 기구로는 온도계, 열전대(thermo couples), 열저항(thermister), 다이오드(diode) 등이 있으나 열전대와 열저항이 현장에서 가장 많이 사용되고 정도는 0.2°C 정도면 충분하다. 이외에 각종 물리탐사 방법이 광범위하게 이용되고 있다.

5. 동토 관련 연구 ^(4,8,9,10,11)

여기서는 세계 각국의 동토와 관련된 연구기관, 학술회의 및 기술서적에 대하여 간략히 소개한다.

5.1 연구기관

미국

◦ CRREL(Cold Regions Research and Engineering Laboratory),

Corps of Engineers, Dept. of the Army, Hanover, N.H. 03755.

미 육군 공병단 소속연구소로서 약 280명의 직원을 가진 세계 최대규모이며 이공학적 연구를 광범위하게 수행하였으나 최근에는 보다 실용적인 연구를 함. 전신은 ACFEL (Arctic Construction and Frost Effects Laboratory) 와 SIPRE(Snow, Ice, & Permafrost Research Establishment) 이고 1961년에 CRREL로 통합, 개편되었으며 8개 분야의 연구를 수행.

◦ Rocky Mountains Forest and Range Experiment Station,

Dept. of Agriculture, Fort Collins, Col. 80526.

미국 농림부 산하 연구기관으로 산지의 눈과 눈사태(avalanche)의 연구, 눈사태 경보 시스템을 코로라도주에서 운영하고 있음.

◦ Forestry Sciences Laboratory,

Pacific Northwest Forest and Range Experimental Station, Dept. of Agriculture, Juneau, Alaska 99802.

용설수의 침투에 의한 토사붕괴에 관한 연구가 대표적임.

◦ 기타

Northwestern 대학, Colorado 대학, Ohio 주립대학, Montana 주립대학, Alaska 대학과 그 부설연구소에서 연구

캐나다

○ Geotechnical Section,

Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa, K1A 0R6.

'88-'89년도에 1) 얼음-구조물 상관관계 2) 열 펌프 구동용 지반 열원, 열저장시스템
3) 동토공학 4) 눈사태 공학과 제어의 4개분야에 연구진 19명이 연구중

일본

○ 북해도 대학 저온과학연구소, 삿포로시 소재

1935년 설립된 저온연구실이 1941년 지금 이름으로 개편. 물리학, 응용물리학, 기상학, 해양학, 설해과학, 동상학, 용설과학, 강설물리학, 식물동해과학, 동물학, 생리학, 생화학의 12개 부문의 연구를 수행

○ 국립극지 연구소, 도오코시 소재

남극 빙상 또는 해빙의 생성, 유동 및 변동을 연구, 일본 극지 설빙학의 선타기 능력을 함.

○ 국립방재과학기술센터, 신조 지소, 야마가타현 신조시 소재

눈에 관한 이공학적 연구, 눈의 재해에 관한 연구

○ 과학기술청 설해실험연구소, 니이가타현 나가오카시 소재

제1 연구실에서 눈사태 예지 및 눈의 구조, 제2 연구실에서 눈에 관한 계측, 제3 연구실에서는 각종 제설기계에 대해 연구

○ 건설성 토목연구소, 니이가타시험소, 니이가타현 아로이시 소재

강설예측, 눈사태 발생예지 및 방어시설, 도로관계 설빙문제 연구

○ 임야청 임업시험장, 이바라기현 소재

제1 및 제2 연구실에서 눈사태 방지림, 눈사태 방지책, 눈사태 예측, 눈사태 발생기구 등을 연구

◦ 국철 철도기술연구소, 도로교 고꾸분지시 소재

지반·방재연구실과 설해방지 실험소에서 제설, 설압 등 설빙문제를 연구

◦ 일본 도로공단시험소, 도오교 마찌다시 소재

설빙 대책 시험실에서 제설 등 고속도로에 있어서의 설빙대책 연구

◦ 기타

북해도 개발국 토목시험소의 방설시설 연구와 니아가타 대학의 적설지역 재해연구센터, 나고야 대학의 수권과학연구소 등에서 이공학적 연구를 수행

유럽

◦ Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, Davos, Switzerland.

물리학자, 삼림공학자, 토목공학자 및 수문학자로 구성된 32명의 연구진이 제1 연구실 : 기상, 눈 및 눈사태, 제2 연구실 : 눈의 역학과 공학 제3 연구실 : 눈과 삼림공학, 제4 연구실 : 적설과 얼음물리학을 연구

◦ Laboratory of Glaciology and Geophysics of Environment,

Natronal Scientific Research Center, Ministry of Universities, Grenoble-Cedex, France

얼음, 빙하 및 빙하의 변동에 관계하는 기후의 장기변동과 대기오염 농도의 관계 등을 연구

◦ NGI(Norwegian Geotechnical Institute), Oslo 8, Norway

10명 내외의 연구진이 자연의 재해제어, 재해 위험지도의 작성, 설압, 눈사태 발생기구 등을 연구

중국

◦ Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica,

Lanzhou, Gansu, Peoples Republic of China

중국 과학원 소속으로 난주에 있고 3개의 연구실에서 빙하(60인), 동토(80인), 토석류(20인) 등을 연구하고 있고 청해성이나 서장의 동토에 대한 조사, 연구, 냉동공법에 대한

연구 등을 하고 있음.

소련

○ 소련 동토학 연구소(Permafrost Institute), Bolshoy Cherkasskiy pereulock, 2/10, Moscow

1939년 Moscow에 본부가 설립되고 1956년에 Yakutsk, 기타 Vilyui, Igarka 및 Kazakh 등의 지역에 지소가 설치됨. 약 100명의 연구진이 1) 영구동토 및 계절동토 2) 동토의 기원과 물리학 3) 지반 하층부의 영구동토 발생과 그 역학 4) 동토지역에서의 농업개간 및 경제개발방법 연구 5) 설빙학 연구 등을 수행한다. 또한 동토의 분포지도를 작성하고 있으며 이 연구소의 연구결과가 시베리아 및 극동지역의 개발계획을 수립하는데 중요하게 활용되고 있음.

5.2 학술회의

미국 토목학회의 한지공학 기술위원회(Technical Council on Cold Regions Engineering)가 후원하는 한지공학 국제학술회의(International Conference on Cold Regions Engineering), 캐나다 국립연구소(NRC)의 토질공학 연구 위원회 (Committee on Geotechnical Research)와 캐나다 토질공학회가 주관하는 캐나다 영구동토 학술회의(Canadian Permafrost Conference), 그리고 중국도 국내 영구동토 학술회의(National Conference on Permafrost)를 정기적으로 개최하고 있다.

5.3 기술서적

미국 토목학회에서 Journal of Cold Regions Engineering를 1987년부터 년4회 발간하고 있으며 Amsterdam 소재 Elsevier Science Publications에서 Cold Regions Science and Technology를 발간하고 있다.

전술한 각 연구기관에서 연구보고서 형식의 기술서적이 발간되고 있으며 Canada에서는 "Canadian Geotechnique"에, 일본에서는 "토 와기초"에, 또한 극지에서의 석유나 가스의 탐사와 채취에 관련된 자료는 해양공학(Offshore engineering) 관련 국제회의 논문집에 실리며 남극

과 관련된 연구 및 지질학적 연구결과는 Geological Society of America Bulletin 에 게재가 되고 있다. 동상에 관계되는 자료는 도로관계 기술지에 많이 게재된다. 전술한 CRREL에서는 소련에서 발간되는 자료를 선별하여 영어로 번역발간하고 있다. 미국 Boulder에 있는 Colorado 대학의 World Data Center에서는 세계각지로 부터 수집된 설빙관계 자료를 수집하여 문헌초록을 발간한다.

6. 인간과 극한기후(4)

○ 기온과 체온

인간은 정온동물, 즉 주변기온에 관계없이 일정한 체내온도를 유지하는 동물에 속한다. 정상인의 체내온도는 36.4°C 에서 37.5°C 사이에 있고 평균 37°C 이다. 정온동물의 체내 온도범위는 코끼리의 36°C 에서 조류의 41°C 까지이다. 체내 온도는 신진대사에 의한 열공급과 피부조직, 의복을 통한 전도와 대류, 피부표면에서의 수분증발 및 호흡기를 통한 열손실 사이의 평형으로 유지된다(그림6.1 참조). 열공급보다 열손실이 크면 체온은 저감한다. 추워지면 인체는 혈관운동조정(vasomotor control)이라는 기능에 의해 피부조직의 혈관을 축소 또는 확대하여 열흐름을 다소 조절한다. 더 추워져서 임계온도에 가까워지면 근육의 수축으로 몸서리치게 되고 신진대사량을 증가시키거나 의복의 보온상태를 증가시켜야 한다. 극지동물의 임계온도는 -20°C 정도로서 인간의 20°C 보다 낮고 혈관운동 조정 기능도 인간(그림 6.2 곡선 1) 보다 뛰어나서(그림 6.2 곡선 2) 추위에 보다 잘 적응한다. 그림 6.2에서 M은 1 met로서 이는 앉아서 쉬고 있는 사람의 신진대사량과 같은 열흐름량을 나타내는 단위로서 $5.0 \text{ kcal/h}\cdot\text{m}^2$ 에 해당된다.

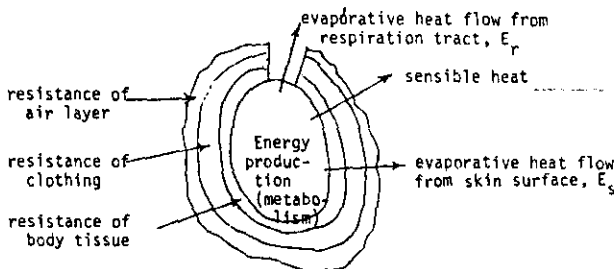


그림 6.1 육체의 열흐름

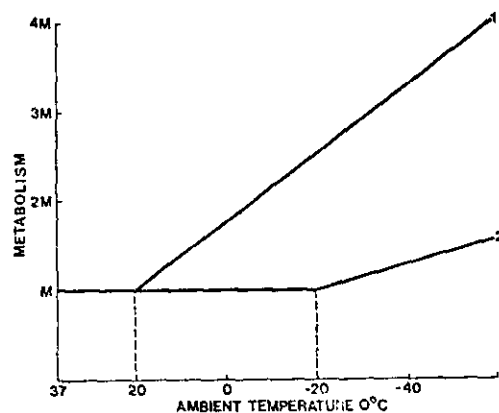


그림 6.2 두 동물의 열손실 비교

○ 추위에 대한 느낌

사람이 느끼는 추위는 주관적이며 사람에 따라 많은 차이가 있을 수 있으나 대체로 표 6.1과 같다고 한다.

표 6.1 피부온도와 추위에 대한 느낌

느 낌	피부온도, °C	손 피부의 온도, °C
Comfortable	33.3	-
uncomfortably cold	31.0	20
shivering cold	30.0	-
extremely cold	29.0	15
painful	-	5
the lower limit w/out numbness	25.0	-

바람이 있을 때는 보다 춥게 느껴지므로 바람이 없을때($u = 2.23 \text{ m/sec}$) "윈드.칠"(wind-chill)이 같게 되는 기온을 "윈드.칠" 기온(또는 유효기온, 등가기온)이라 하며

$$T_{eq} = 33 - [0.432\sqrt{u} + 0.451 - 0.0432u] (33 - T_a)$$

로 계산할 수 있다. 여기서 u 는 m/sec 단위의 풍속, T_a 는 $^{\circ}\text{C}$ 단위의 기온을 나타낸다. 이 식에서는 피부온도가 33°C 라는 가정이 포함되어 있으며 "윈드.칠"이라는 개념자체도 주관적인 것이다.

○ 육체의 손상

추우면 신체 각부의 기능에 일시적 또는 영구적 손상이 올 수 있고 특히 지체 말단부에 영향이 크다. 심장은 10°C 내지 18°C 이하의 온도에서 정지하므로 이것이 체내온도의 최저한계이다.

참호족(trench foot), 침수족(immersion foot) 등은 한기와 습기로 일어나는 발병이며 통증이 심해지면 감각상실과 함께 부어오르고 심하면 탈저(脫疽) 현상을

일으켜 절단해야 하기도 한다.

체내온도가 떨어지면 심장의 활동이 둔화되고 두뇌에의 혈액공급이 감소되어 말을 더듬고 비틀거리며 심장미비를 일으키기도 한다. 이를 체온저하(Hypothermia)라 부른다.

○ 시계(visibility)의 저하

극지에서는 여러가지 이유로 시계에 제한을 받게 된다. 풍속이 13 kph 이상되면 눈이 날려서 시계를 제한하고 지표가까이 기온차에 의해 형성된 공기층을 통과하는 빛의 굴절로 물체가 의곡되는 대기비등(atmospheric boil) 현상과 지면이 급속히 냉각하여 기온전도(temperature inversion)가 일어나면 얼음안개(ice fog)가 발생되어 시계를 제한한다. 공기의 이슬점 온도(dew point temperature)가 0°C 이상이면 보통의 안개가 형성되나 0°C 이하이면 얼음안개가 형성된다. 지표가까이 정체된 공기층에 얼음안개가 형성되었을때 태양의 복사가 다소 증가하면 이 정체된 공기층이 약간 위로 올라가고 복사광은 눈덮인 지표와 안개층 사이에서 반사, 산란, 재반사 하게 된다. 이때 그림자와 지평선이 없어지며 물체의 크기나 방향에 대한 감각이 저하된다. 이를 극지 백명(Arctic White out) 현상이라 부른다. 또한 태양의 복사광이 눈이나 얼음에 반사될 때 시력에 손상을 줄 수 있으므로 하계에는 눈의 보호장비를 갖추어야 한다. 북극권, 즉 북위 $66^{\circ}33'$ 의 지점에서는 하지에 24시간의 낮, 동지에 24시간의 밤이 있다(백야). 낮과 밤의 길이는 북쪽으로 갈수록 점차 길어져서 북위 70° 선이면 5월 하순부터 8월 초순까지는 24시간의 낮, 11월 하순부터 1월 하순까지는 24시간의 밤이 있다. 극지에서는 태양의 고도가 낮고 지표의 반사율(80%)이 커서 봄과 가을이 짧고 봄이 지연된다. 눈녹자 꽃 피는 봄은 6월 또는 7월초가 되기도 한다.

동계의 긴밤은 사람에게 심리적 문제를 일으키며 사람의 활동을 제약하는 것으로 알려져 있다.

○ 건설활동

미 육군 공병단의 한지연구소(CRREL)가 Alaska에서 활동하고 있는 건설회사의 관계자들에게 인간과 건설장비가 작업할 수 있는 한계온도에 관하여 설문조사한것이 표 6.2와 같다.

표 6.2 한지에서의 인간과 기계에 대한 극단기온

활 동	최 저 한 계 온 도 °C		효 율 적 작 업 을 위 한 한 계 온 도 °C	
	범 위	평 균	범 위	평 균
기계굴착	-57 ~ -29	-38	-34 ~ 0	-18
인력굴착	-57 ~ +2	-30	-34 ~ 0	-8
토공	-43 ~ -29	-37	-29 ~ 0	-10
포장공	-9 ~ +43	0	-4 ~ +15	+5
콘크리트 형틀공	-45 ~ -23	-32	-23 ~ 0	-12
콘크리트 타설	-45 ~ -32	-35	-7 ~ +4	0
철구조 조립	-45 ~ -29	-35	-34 ~ -1	-18
블럭, 석재 조적공	-45 ~ -18	-32	-18 ~ +4	0
목공 마감일	-43 ~ -23	-25	-9 ~ +10	+2
도장	-45 ~ +4	-10	0 ~ +15	+5
전기공사	-57 ~ -23	-35	-7 ~ +4	-2
배관, 기계공사	-45 ~ -23	-33	-7 ~ +4	-2
배관 용접	-45 ~ -18	-29	-34 ~ 0	-13
측탕	-45 ~ -18	-36	-34 ~ -7	-17
적재, 하역	-51 ~ -23	-39	-37 ~ -7	-18
지반 조사	- -	-40	- -	-

○ 의 복

한지에서의 의복은 우선 보온성능이 좋아야 한다. 의복의 보온성능을 표시하는 단위로 clo를 사용하는데 1 clo는 공기속도가 10cm/sec 이고 21 °C의 실내에서 앉아서 쉬는 사람이 안락하게 느끼는 실내복의 열전달정도를 나타내는 것으로 0.18 °C·h·m² /kcal에 해당된다. 한지의복의 현실적인 최대한도는 4.0 clo/in. 이고 사람의 활동성을 저해하지 않는 의복의 두께는 1 1/2 in.(3.8 cm) 이므로 최대 6.0 clo의 보온성능이 가능하다. 바람이 있을 때 통기성이 큰 의복의 값은 바람이 없을 때에 비해 크게 떨어지므로 한지의복은 가급적 기밀해야 한다. 사람이 활동하면 땀이 나게 되고 이 땀이 의복속에 응축되어 동결하면 보온효과의 저감과 중량의 증가를 가져온다. 따라서 한지의복은 배수성이 좋아야 한다. 한지에서 활동하게 되면 더워서 견디기 힘들 수가 있으므로 여러겹으로 되어 단계적으로 쉽게 벗을 수 있어야 하며 많은 종류를 입게 되므로 가벼워야 한다. 이러한 요건을 거의 만족시키는 것이 Eskimo 또는 Inuit 족의 동계의복이다. 이들 의류의 단위중량에 대한 보온성은 서구인의 동계의류에 비해 4~5배 정도 우수한 것으로 알려져 있다.

○ 음 식

인간이 활동하려면 에너지가 필요하고 이는 음식으로 공급된다. 표 6.3은 사람의 활동상태에 따른 신진대사량으로서 음식으로 섭취할 최소한의 열량이다. 정상적인 상황에서도 이보다 더 큰 열량이 필요하고 예를 들어 미국 국립연구위원회(NRC)에서 권장하는 음식 섭취량은 연령이 22세에서 35세 사이의 남자로서 키가 175cm, 체중이 70kg인 경우 매일 2800 kcal이다. 극한지에서는 열손실이 크므로 영양섭취량도 커야 한다. 예를 들어 1985년 12월 3명의 영국인이 1911년 겨울의 Scott 탐험대 탐험경로를 재현하는 탐험을 계획할 때 최소한 매일 8000 kcal(음식으로 약 1.4kg)의 열량이 필요한 것으로 계산되었다.

표 6.3 활동상태에 따른 신진대사량

A c t i v i t y	Metabolism	
	kcal/m ² /h	Met
sleeping, post digestive	36	0.72
sleeping, digesting	40	0.80
Lying quitely, post digestive	40	0.80
Lying quitely, digesting	45	0.90
Sitting	50	1.00
Standing	60	1.20
Walking, 2.4 km/h	90	1.80
Level walking, 4.8 km/h (light work)	130	2.60
Level walking, 6.4 km/h (moderate work)	180	3.60
Level running, 16 km/h (exhausting work)	500	10.00
Sprinting	2,000	40.00

7. 참고 문헌

1. 日本土質工學會 (1982), "흙의 동결 - 그 제어와 응용," 토질.기초공학 라이브리-23, 269 p.
2. Lunardini, V. J. (1981), "Heat Transfer in Cold Climates," Van Nostrand Reinhold Co., 731P.
3. National Research Council Canada (1988)," Construction Research, 1988-1989," "Institute for Research in Construction, 45p.
4. Andersland, O. B. and D. M. Anderson (1978)," Geotechnical Engineering for Cold Regions," McGraw-Hill Book Co., 566p.
5. U.S. Dept. of the Army and the Air Force (1966)," Technical Manual 5-852"
6. Academy of Sciences of U.S.S.R. (1955)," Fundamental Concepts and Terms in Geocryology," ACFEL Translation, No. 28, Corps of Engineers, U.S. Army, 1960.
7. Phukan, A. (1985),"Frozen Ground Engineering," Prantice-Hall, Inc., 336P.
8. 나카무라(中村 勉) (1982),"토질공학에 있어서 눈과 얼음 - 설빙연구의 역사와 현황," 토와基礎, Vol. 30, No. 7, pp.94-101.
9. Bader, H., K. Haefeli, E. Bucher, J. Neher, O. Eckel, and Chr. Thams(1939)," Snow and Its Metamorphism," SIPRE Translation 14, Corps of Engineers, U.S. Army, 1954, 313p.
10. Chen, X., Z. Wu, and L. Wang (1988),"A Study of two Geotechnical Construction Methods in Cold Regins," Proc. 7th Int. Conf. Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, pp. 335-337.
11. 다케우찌(竹内 政夫) (1986),"눈에 관계하는 연구기관," 日本土木學會誌, 제71권, p.32.
12. Encyclopaedia Britannica, Inc. (1982)"The New Encyclopaedia Britannica,"Vol. 14, Permafrost., pp.89-95

13. Lawson, D. E. et al. (1978)"Tundra Disturbance and Recovery following the 1949 Exploratory Drilling, Fish Creek, Northern Alaska,"CRREL Report 78-28.
14. Mitchell, J. K. (1976),"Fundamentals of Soil Behavior, " John Wiley and Sons. Inc., Chapt. 15, Conduction Phenomena,pp. 340-383.
15. McDowell, B. and D. Conger (1979)," Journey Across Russia : The Soviet Union Today," pp.327-361, "Siberia-The Endless Horizon," National Geographic Society, Washington, D. C.